·论著·

等速肌力测试对膝关节伸展 1RM 的预测能力研究

翟乃胜，黄莉华，张也*

200233 上海，上海交通大学医学院附属第六人民医院康复医学科
*通讯作者：张也，主管技师；Email：zhang.ye@sjtu.edu.cn

【摘要】**背景** 肌肉力量训练是康复的重要组成部分，科学合理的力量训练运动处方通常需要基于等张 1 次重复最大值（1RM）的百分比进行设置。然而准确的 1RM 在实际中较难获得，患者常因缺乏合适的阻力训练处方而降低了肌力训练的效率并延缓整体功能的恢复。**目的** 探究等速肌力测试对膝关节伸展 1RM 的预测能力，并建立基于等速肌力测试结果的 1RM 预测方程。**方法** 于 2024 年 3—6 月通过网络平台及宣传海报招募 61 名健康志愿者作为受试组，采用 60° /s 角速度进行膝关节等速肌力测试和膝关节伸展 1RM 测试，采集峰力矩（PT）、峰值力（PF）及 1RM。采用 Pearson 相关性分析 PT、PF 与 1RM 的相关性，采用一元线性回归法建立 1RM 预测方程。采用 Bland-Altman 图评估 1RM 预测方程的预测值与实测值的一致性。**结果** 61 例受试者中，男性 23 例，平均年龄（25.6±6.0）岁；女性 38 例，平均年龄（24.5±5.3 岁）。相关性分析结果显示，男性和女性 PT 值、PF 值与 1RM 均呈正相关（$P<0.05$）。基于 PF 值的 1RM 预测方程，男性为 $y=0.07x+1.836$，$R^2=0.514$；女性为 $y=0.087x+0.858$，$R^2=0.781$；基于 PT 值的 1RM 预测方程，男性为 $y=0.177x+0.25$，$R^2=0.386$；女性为 $y=0.312x+0.464$，$R^2=0.766$。Bland-Altman 检验结果显示，基于 PT 值的 1RM 预测方程 95%LOA：男性为（-8.37~14.81）kg，女性为（-4.47~9.33）kg；基于 PF 值的 1RM 预测方程 95%LOA：男性为（-5.29~10.82）kg，女性为（-4.12~8.87）kg。基于 PF 值的 1RM 预测方程具有更好的一致性。**结论** 在等速肌力测试设备上获得的 PT 值和 PF 值均可以用来预测膝关节伸展的 1RM 值，其中 PF 值对 1RM 的预测能力优于 PT 值。

【关键词】 膝关节；预测方程；一次重复最大值；等速运动；峰力矩；峰值力
【中图分类号】 R232.72 【文献标识码】 A DOI：10.12114/j.issn.1007-957.2024.0570

Research on the Predictive Ability of Isokinetic Strength Testing for Knee Joint Extension of 1RM

*ZHAI Naisheng，HUANG Lihua，ZHANG Ye**

Department of Rehabilitation Medicine，Shanghai Sixth People's Hospital Affiliated to Shanghai Jiao Tong University School of Medicine，Shanghai 200233，China.

**Corresponding author：ZHANG Ye，Supervising technician；E-mail：zhang.ye@sjtu.edu.cn*

【Abstract】**Background** Muscle strength training is an important part of rehabilitation. Scientific and reasonable strength training exercise prescription usually needs to be set based on the percentage of 1-repetition maximum（1RM）. However，accurate 1RM is difficult to obtain in practice，so patients often lack appropriate resistance training prescription，which reduces the efficiency of muscle strength training and delays the recovery of overall function. **Objective** To explore the predictive ability of isokinetic muscle strength test for 1RM of knee extension and establish the 1RM prediction equation based on isokinetic muscle strength test results. **Methods** From March to June 2024，61 healthy volunteers were recruited as the test group through the network platform and propaganda posters. Isokinetic muscle strength test and 1RM test of knee extension were carried out at an angular velocity of 60 ° /s，then peak torque（PT），peak force（PF）and 1RM were collected. Pearson correlation analysis was performed between PT，PF and 1RM，and univariate linear regression equations were established. Bland Altman plot was constructed to evaluate the consistency between predicted value and the measured value of 1RM prediction equation . **Results** Among the 61 subjects，23 were male，with an average age of （25.6±6.0）years；There were 38 females with an average age of（24.5±5.3）years. The results of correlation analysis showed that the PT and PF value of male and female were positively

基金项目：上海市卫生健康委员会先进适宜技术推广项目（2019SY013）；上海市第六人民医院资助项目（X 院内 -5562）
引用本文：翟乃胜，黄莉华，张也．等速肌力测试对膝关节伸展 1RM 的预测能力研究［J］．中国全科医学，2024. DOI：10.12114/j.issn.1007-957.2024.0570.［Epub ahead of print］［www.chinagp.net］
ZHAI N S，HUANG L H，ZHANG Y. Research on the predictive ability of isokinetic strength testing for knee joint extension of 1RM［J］. Chinese General Practice，2024.［Epub ahead of print］

correlated with 1RM（*P*<0.05）. The 1RM prediction equation based on PF value is y=0.07x+1.836 for male，R^2=0.514；y=0.087x+.858 for female，R^2=0.781；Based on the 1RM prediction equation of PT value，y=0.177x+0.25 for male，R^2=0.386；y=0.312x+0.464 for female，R^2=0.766. The test results showed that the 95%LOA of 1RM prediction equation based on PT value was（-8.37-14.81）kg for male and（-4.47-9.33）kg for female. The 95%LOA of 1RM prediction equation based on PF value was （-5.29-10.82）kg for male and （-4.12-8.87）kg for female. The 1RM prediction equation based on PF value has better consistency. **Conclusion** The results showed that the PT value and PF value obtained on the isokinetic dynamometer can be used to predict the 1RM value of knee extension，and the predictive ability of PF value for 1RM is better than PT value.

【Key words】 Knee joint；Prediction equation；1-repetition maximum；Isokinetic motion；Peak torque；Peak force

股四头肌无力是膝关节损伤或术后常见的功能障碍，严重影响患者的功能和运动表现，科学合理的阻力训练计划对于改善股四头肌无力具有重要意义[1-3]。目前，阻力训练运动处方通常基于等张 1 次重复最大值（1-repetition maximum，1RM）的百分比进行设置，1RM 对于肌力训练具有很好的指导价值[4-5]。尽管 1RM 测试是最大肌力基线测量最佳的测试之一[6]，但实际应用中存在一定局限性，如受试者对测试本身的畏难心理、多组测试导致未达到 1RM 之前已经产生疲劳、测试方式复杂、耗时久以及负荷较大、对关节造成较大压力等诸多问题[7-9]，导致 1RM 测试在实际临床应用中并不普及。临床上患者在阻力训练前很少进行 1RM 测试，且缺乏合适的阻力训练处方，极大地影响了肌力训练的效率和整体功能的恢复。因此，使用准确、省时且安全的方式来估算 1RM 是非常有必要的。

等速肌力测试是在临床上被广泛使用和接受的最大力量测试方法。等速肌力测试凭借其较好的重复性、精确性和安全性，目前被认为是肌力评估的“金标准”[10-12]。等速肌力测试可使肌肉在整个关节活动中，根据受试者的实际肌力情况提供对应的最大顺应性阻力，在精确量化肌力的同时，不会造成负荷过大引起损伤[13]。等张肌力测试 1RM 提供了一个人可以进行给定运动的完全重复的最大负荷，而等速肌力测试峰力矩[14]（peak torque，PT）和峰值力[15]（peak force，PF）测试提供了参与恒速运动的肌肉所施加的最大力矩和最大力。1RM、PT 及 PF 均能反映肌肉收缩最大能力，本研究将膝关节伸展 1RM 测试的结果与等速膝关节伸展的 PT 与 PF 进行比较，旨在探究等速 PT 和 1RM 之间的相关性并建立回归方程，以建立一种更加安全、高效的获得等张 1RM 的方式，为广大需要力量训练的人士提供参考依据。

1 对象与方法

1.1 研究对象

于 2024 年 3—6 月通过网络社交平台及宣传海报从上海市招募 61 例健康志愿者作为受试组。样本量计算：采用线性回归分析法，以样本量为因变量，伸膝 PT 值或 PF 值为自变量，根据 10EPV（events per variable）法则，样本量至少为 10 例，最终纳入 61 例，其中男性 23 例，女性 38 例。同样基于 10EPV 法则，另纳入 40 例健康志愿者（男性和女性各 20 例）作为验证组用于预测方程验证。

纳入标准：（1）健康成年人；（2）年龄 20~40 岁。排除标准：（1）任何严重的神经、内分泌、精神、心肺疾病、药物或酒精滥用史；（2）近期肌肉损伤或手术；（3）测试前的 1 周内进行过剧烈的体育活动。本研究获得上海市第六人民医院伦理委员会批准（批准号：2024-KY-138［K］），所有志愿者均被告知研究程序并自愿签署知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 一般资料采集：在肌力测试前，采集研究对象性别、年龄、身高、体质量和动力臂长度等信息。采用 SH-200G 医用身高体重测量仪（郑州上禾电子科技有限公司）测量净身高和体质量。利用 NX A8-3 等速测试设备（广州一康医疗设备实业有限公司）测量动力臂长度，即股骨外侧髁至内外踝连线上 1.5 cm 处的长度。

1.2.2 膝关节等速肌力测试：采用 NX A8-3 等速设备对受试者的随机一侧膝关节进行力量测试。参与者在测试前 1 周，到测试地点熟悉测试程序并体验测试过程。正式测试之前受试者在 Ergoselect 100P 功率自行车（上海诺诚医疗科技有限公司）上进行轻负荷热身 10 min。测试时，受试者坐在等速测试设备上，髋关节弯曲至 80°，股骨外侧髁与动力臂的轴心对齐，动力臂下端固定于内外踝连线上 1.5 cm 处，受试者的躯干、骨盆、测试侧大腿和非测试侧小腿固定良好[16]。将膝关节的运动范围设置为 10° 屈曲到 90°，并进行重力校正，以修正小腿和动力臂重量对伸膝 PT 值的影响。在正式测试之前，在相同的角速度下进行了 4 次适应练习（包括 1 次最大和 3 次次最大等速收缩）。受试者以 60°/s 的角速度进行 5 次测试。记录整个测试过程中引起最大伸膝的 PT 值。根据公式：力 = 力矩 / 动力臂，计算 PF 值。

1.2.3 膝关节伸展 1RM 测试：利用 NX A8-3 等速设备的等张肌力测试模式对同侧下肢进行 1RM 测试，

测试时间为等速肌力测试后 1 周后的同一时间。根据 TAGESSON 等[6]、MACHT 等[9]的方法进行 1RM 测试：首先受试者以自身体重的 20%~30% 进行 2 组的热身，10 次 / 组，每组间隔 3 min。受试者将膝盖从 90° 屈曲伸到 10° ，并在伸展末端保持 1 s，然后以控制的方式回到 90° 屈曲位置。热身完成后，将重量增加 4 kg~20 kg，进行下 1 次重复，每次重复之间休息 5 min。重复上述程序直至受试者只能完成 1 次为止，最后 1 次重复成功完成的重量被认为是受试者的 1RM。尝试次数应在 3~5 次内，若超过 5 次，则需受试者充分休息后调整负荷重新测试。

1.3 统计学分析

采用 SPSS 20.0 软件进行数据分析。符合正态分布的计量资料以（$\bar{x} \pm s$）表示。使用 Shapiro-Wilk 法检验等速伸膝 PT 值、PF 值以及 1RM 数据的正态分布情况。采用 Pearson 相关分析 PT 值、PF 值与 1RM 相关性。采用一元线性回归法建立 1RM 预测方程。采用 Graphpad prism10.1 软件绘制 Bland-Altman 图，评估预测和实际 1RM 之间的一致性。以 P<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 一般资料

受试组 61 例，其中男性 23 例，平均年龄（25.6 ± 6.0）岁，平均体质量（70.2 ± 7.1）kg，平均身高（175.9 ± 6.7）cm，平均动力臂长度（31.46 ± .24）cm；女性 38 例，平均年龄（24.5 ± 5.3）岁，平均体质量（56.2 ± 8.9）kg，平均身高（16.6 ± 5.6）cm，平均动力臂长度（28.7 ± 1.7）cm。

2.2 受试组 PT、PF 值与 1RM 检测

受试组男性平均 PT 值为（185.8 ± 35.2）N·m，PF 值为（590.5 ± 10.7）N，1RM 值为（55.2 ± 7.2）Kg；女性平均 PT 值为（1.3 ± 26.5）N·m，PF 值为（428.6 ± 96.4）N，1RM 值为（41.0 ± 9.5）Kg。

2.3 等速伸膝 PT、PF 值与 1RM 相关性

相关性分析结果显示，男性和女性等速伸膝 PT、PF 值与 1RM 之间均呈正相关（P<0.05），见表 1

表 1 等速伸膝 PT、PF 值与 1RM 相关性

Table 1 Correlation analysis between PT and PF values of isokinetic knee extension and 1RM

项目	男性（n=23）		女性（n=38）	
	r 值	P 值	r 值	P 值
PT	0.621	0.002	0.875	<0.001
PF	0.717	<0.001	0.883	<0.001

注：PT= 峰力矩；PF= 峰值力。

2.4 1RM 预测方程

以 1RM 值为因变量，以 PT 值为自变量进行一元线性回归分析，建立 1RM 预测方程，结果显示：男性为 y=0.177x+0.25，R^2=0.386；女性为 y=0.312x+0.464，R^2=0.766。

以 1RM 值为因变量，以 PF 值为自变量进行一元线性回归分析，建立 1RM 预测方程，结果显示：男性为 y=0.07x+1.836，R^2=0.514；女性为 y=0.087x+0.858，R^2=0.781。

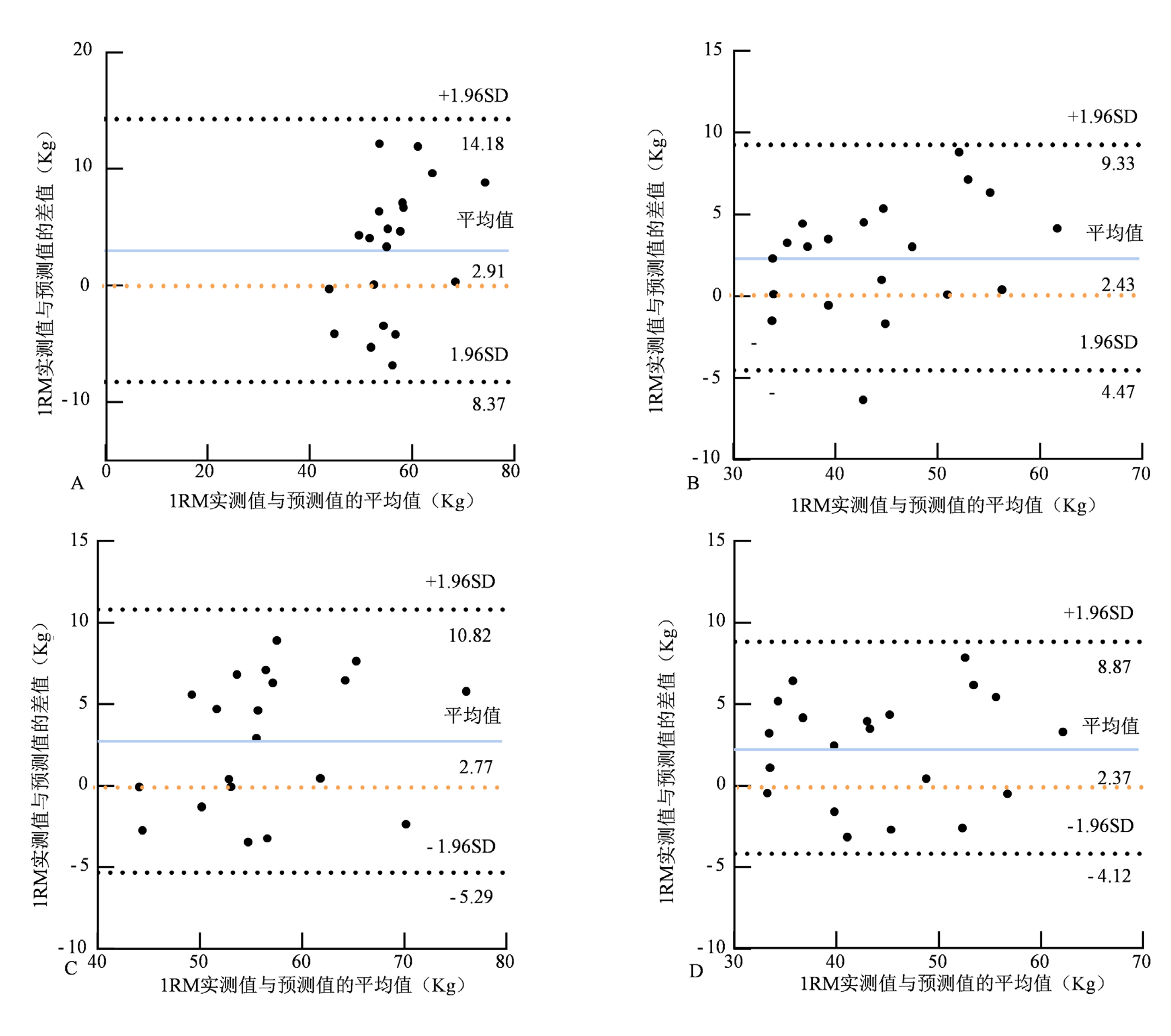
2.5 1RM 实测值与预测值的一致性分析

Bland-Altman 检验结果显示，男性基于 PT 值的 1RM 预测方程 95%LOA 为（-8.37~14.81）kg，女性为（-4.47~9.33）kg；男性基于 PF 值的 1RM 预测方程 95%LOA 为（-5.29~10.82）kg，女性为（-4.12~8.87）kg。基于 PF 值的预测方程 1RM 预测值与实测值间偏倚相对较小，显示出了更好的一致性。

3 讨论

运动损伤人群的数量日益庞大，根据 1RM 选择合适的负荷训练薄弱的肌肉对功能恢复具有重要价值。本研究通过等速肌力测试对膝关节伸展 1RM 进行预测，并建立了基于等速 PT 值和 PF 值的膝关节伸展 1RM 回归模型，可帮助膝关节存在损伤不宜进行 1RM 测试的个体安全地估测 1RM。本研究提供了基于等速测试结果的等张膝关节 1RM 的预测方程，有利于临床上为患者阻力训练选择合适的负荷，提高力量训练的效率，加快患者的康复进程。

以往研究中，基于等速或等长测试结果的预测方程常高估 1RM 值[17]，本研究结果显示，1RM 测量值与实测值虽有较好的拟合度，但基于等速测量值的 1RM 预测方程倾向于略低估个体的 1RM 值，平均低估程度约仅为 2~3 kg。这种差异可能是因为对于 1RM 的测试方式不同。以往研究测试等张 1RM 时未对受试者躯干、骨盆等位置进行良好固定，而在等速或等长测试时则会对这些位置进行固定，便于受试者发力。这导致受试者在进行 1RM 测试时可能由于缺乏稳定性而无法产生最大的收缩[17-18]。本研究等速和等张测试均采取相同的固定方式，受试者可以发挥出更大的肌肉收缩潜力。此外，本研究还表明，PF 值相较于 PT 值对膝关节伸展 1RM 的预测更加准确，呈现出较低的平均误差。基于 PF 值的预测方程相对于基于 PT 值的预测方程平均偏倚及 95% 的置信区间范围相对更小，且相关系数更大。原因可能是 PT 值不仅受个体本身力量大小的影响也受到个体力臂长短的影响[19]，而 PF 值则排除了力臂的影响，更能反映肌肉力量，因此基于 PF 值的预测方程对 1RM 值的预测更加准确。本研究发现，女性的等速测量值与等张 1RM 之间较男性具有更好的相关性且预



注：A 为男性基于 PT 值的预测方程 1RM 实测值与预测值的 Bland-Altman 图，B 为女性基于 PT 值的预测方程 1RM 实测值与预测值的 Bland-Altman 图；C 为男性基于 PF 值的预测方程 1RM 实测值与预测值的 Bland-Altman 图；D 为女性基于 PF 值的预测方程 1RM 实测值与预测值的 Bland-Altman 图。

图 1 基于 PT、PF 值的预测方程 1RM 实测值与预测值的 Bland-Altman 图

Figure 1 Bland-Altman plot of measured and predicted values of 1RM prediction equation based on PT and PF values

测方程要比男性的更加准确。这可能是由于男性与女性在肌肉组成成分上的生理差异[20-22]，这也是本研究为男性与女性分别建立预测方程的主要原因。

本研究存在一定的局限性：（1）虽然通过确定一个人的最大力量，可以设计更多个体化（基于 1RM）的规范性康复方案，以实现力量的增加，但是本研究的参与者样本是年轻、健康的个体，近期没有膝关节损伤，导致研究的结果不能完全推断出有膝关节损伤个体的力量。未来的研究应该在有膝关节损伤的患者（如前交叉韧带重建）中进一步探索，以建立更加符合对应群体的预测方程。（2）本研究中的受试者年龄在 20~40 岁之间，其他年龄段并未覆盖，无法对其他年龄段人群的 1RM 值进行较好的预测。（3）本项研究旨在建立便于临床上应用的预测方程，所以仅以等速测量结果作为自变量，其他的可能对 1RM 值产生影响的指标如体脂率、BMI 等因素并未纳入方程中，这在一定程度上限制了预测方程的准确性。未来的研究应关注存在膝关节损伤人群，青少年及老年人群的预测方程。另外，在方程的建立阶段，应将更多可提高方程预测能力的因素如体脂及 BMI 等纳入其中。

等速肌力测试设备可用于安全地预测个体的膝关节伸展等张 1RM，为选择使用 1RM 的百分比来确定运动

负荷的康复方案提供便利。临床医生或者教练可通过本研究中生成的预测模型来预测患者或运动员的1RM值，根据训练需求选择合适阻力进行训练以助力早日达到肌肉强化目标。未来的研究应该收集更多的数据来验证并进一步完善这一预测模型。

作者贡献：翟乃胜、黄莉华及张也提出研究思路，设计研究方案，研究命题的提出、设计；张也负责进行试验，研究过程的实施；翟乃胜负责数据收集、采集、清洗和统计学分析、绘制图表等及论文起草；翟乃胜及张也负责最终版本修订，对论文负责。

本文无利益冲突。

张也 https://orcid.org/0000-0002-6819-920X

参考文献

[1] ØIESTAD B E，JUHL C B，CULVENOR A G，et al. Knee extensor muscle weakness is a risk factor for the development of knee osteoarthritis：an updated systematic review and meta-analysis including 46 819 men and women[J]. Br J Sports Med，2022，56(6)：349-355. DOI:10.1136/bjsports-2021-104861.

[2] MOHAJER B，DOLATSHAHI M，MORADI K，et al. Role of thigh muscle changes in knee osteoarthritis outcomes：osteoarthritis initiative data[J]. Radiology，2022，305（1）：169-178. DOI:10.1148/radiol.212771.

[3] CHEN L，ZHOU H J，GONG Y C，et al. How do muscle function and quality affect the progression of KOA? A narrative review[J]. Orthop Surg，2024，16（4）：802-810. DOI:10.1111/os.140.

[4] FOLLAND J P，WILLIAMS A G. The adaptations to strength training：morphological and neurological contributions to increased strength[J]. Sports Med，2007，37（2）：145-168. DOI:10.2165/00007256-200737020-00004.

[5] GARBER C E，BLISSMER B，DESCHENES M R，et al. American College of Sports Medicine position stand. Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory，musculoskeletal，and neuromotor fitness in apparently healthy adults：guidance for prescribing exercise[J]. Med Sci Sports Exerc，2011，43（7）：1334-1359. DOI:10.1249/MSS.0b013e318213fefb.

[6] TAGESSON S K B，KVIST J. Intra- and interrater reliability of the establishment of one repetition maximum on squat and seated knee extension[J]. J Strength Cond Res，2007，21（3）：801-807. DOI:10.1519/R-20846.1.

[7] MAZUR L J，YETMAN R J，RISSER W L. Weight-training injuries. Common injuries and preventative methods[J]. Phys Med Auckl N Z，1993，16（1）：57-63.

[8] POLLOCK M L，CARROLL J F，GRAVES J E，et al. Injuries and adherence to walk/jog and resistance training programs in the elderly[J]. Med Sci Sports Exerc，1991，23（10）：1194-1200.

[9] MACHT J W，ABEL M G，MULLINEAUX D R，et al. Development of 1RM prediction equations for bench press in moderately trained men[J]. J Strength Cond Res，2016，30（10）：2901-2906. DOI:10.1519/JSC.0000000000001385.

[10] PARRACA J A，ADSUAR J C，DOMÍNGUEZ-MUÑOZ F J，et al. Test-retest reliability of isokinetic strength measurements in lower limbs in elderly[J]. Biology，2022，11（6）：80. DOI:10.3390/biology1106080.

[11] STARK T，WALKER B，PHILLIPS J K，et al. Hand-held dynamometry correlation with the gold standard isokinetic dynamometry：a systematic review[J]. PM R，2011，3（5）：472-479. DOI:10.1016/j.pmrj.2010.10.025.

[12] 张静云，王莹莹，王春方，等. 基于等速技术的健康成人膝关节屈伸肌肌力的年龄和性别特征的研究[J]. 中国康复医学杂志，2020，35（1）：54-59. DOI：10.3969/j.issn.1001-124.2020.01.011.

[13] GLEESON N P，MERCER T H. The utility of isokinetic dynamometry in the assessment of human muscle function[J]. Sports Med，1996，21（1）：18-34. DOI:10.2165/00007256-199621010-0000.

[14] HISLOP H J，PERRINE J J. The isokinetic concept of exercise[J]. Phys Ther，1967，47（2）：114-117.

[15] ORANCHUK D，JUNEAU C，DIEWALD S，et al. The validity of a portable strain-gauge apparatus versus a commercial isokinetic dynamometer for evaluating knee extension kinetics[J]. Int J Sports Phys Ther，2024，19（3）：258-267. DOI:10.26603/001c.9274.

[16] KUKIĆ F，MRDAKOVIĆ V，STANKOVIĆ A，et al. Effects of knee extension joint angle on quadriceps femoris muscle activation and exerted torque in maximal voluntary isometric contraction[J]. Biology，2022，11（10）：1490. DOI:10.3390/biology11101490.

[17] LESNAK J B，ANDERSON D T，FARMER B E，et al. Ability of isokinetic dynamometer to predict isotonic knee extension 1-repetition maximum[J]. J Sport Rehabil，2019，29（5）：616-620. DOI:10.1123/jsr.2018-0396.

[18] VERDIJK L B，VAN LOON L，MEIJER K，et al. One-repetition maximum strength test represents a valid means to assess leg strength in vivo in humans[J]. J Sports Sci，2009，27（1）：59-68. DOI:10.1080/02640410802428089.

[19] DYGUT J，PIWOWAR M. Torques in the human upper ankle joint level and their importance in conservative and surgical treatment[J]. Sci Rep，2024，14（1）：7525. DOI:10.1038/s41598-024-57698-4.

[20] NUZZO J L. Narrative review of sex differences in muscle strength，endurance，activation，size，fiber type，and strength training participation rates，preferences，motivations，injuries，and neuromuscular adaptations[J]. J Strength Cond Res，2023，37(2)：494-536. DOI:10.1519/JSC.0000000000004329.

[21] BREDELLA M A. Sex differences in body composition[J]. Adv Exp Med Biol，2017，1043：9-27. DOI:10.1007/978-3-319-70178-3_2.

[22] EL-ASHKER S，ALLARDYCE J M，CARSON B P. Sex-related differences in joint-angle-specific hamstring-to-quadriceps function following fatigue[J]. Eur J Sport Sci，2019，19（8）：1053-1061. DOI:10.1080/17461391.2019.1574904.

（收稿日期：2024-10-24；修回日期：2024-12-02）
（本文编辑：李卫霞）